

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Коноплінський Максим Анатолійович



УДК 621.313.333.2:62-83

**АДАПТИВНЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ
ДВИГУНАМИ ПРИ ВАРІАЦІЯХ АКТИВНИХ ОПОРІВ
СТАТОРА ТА РОТОРА**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Пересада Сергій Михайлович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мороз Володимир Іванович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри електроприводу і
комп'ютеризованих електромеханічних систем;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Шаповал Іван Андрійович,
Інститут електродинаміки НАН України,
старший науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів.

Захист відбудеться «29» червня 2016 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» за адресою:

03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» за адресою:

03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «__» травня 2016 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. М. Ковальчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Основними споживачами електроенергії в промисловості є електромеханічні системи (ЕМС) з асинхронними двигунами (АД). В ЕМС різних технологічних об'єктів з підвищеними вимогами до динамічних та статичних показників якості керування широке розповсюдження отримали векторно-керовані АД. До таких об'єктів, в першу чергу належать системи керування рухом промислових роботів, металорізальних верстатів, спеціальної техніки, прокатного виробництва та інші.

Актуальність теми. Проблема керування моментом (швидкістю) та модулем вектора потокозчеплення асинхронного двигуна є складною нелінійною багатовимірною задачею при частковій вимірюваності вектору стану в умовах параметричних збурень, основними з яких є зміни активних опорів статора і ротора внаслідок нагріву.

Варіації активного опору ротора при векторному керуванні призводять до порушення асимптотичності полеорієнтування та, як наслідок, до зниження показників якості керування моментом і потоком, а також зниження показників енергетичної ефективності електромеханічного перетворення енергії, що додатково потребує завищення потужності двигуна та інвертора.

Підходи до вирішення цієї проблеми можна розділити на робастні та адаптивні. Зазвичай робастні алгоритми забезпечують відносно прості рішення при частковій компенсації дії обмежених варіацій лише активного опору ротора. Недолік даного способу полягає в тому, що ефективність компенсації залежить від режимів роботи електромеханічного об'єкта. Варіації активного опору статора, в залежності від механізму робастифікації, можуть викликати суттєві порушення асимптотичності полеорієнтування навіть при коректному значенні активного опору ротора в алгоритмі робастного керування.

Адаптивні методи забезпечують асимптотичне відпрацювання потокозчеплення та механічних координат в умовах варіації тих параметрів, до яких передбачена адаптація. Варіації активного опору *статора*, при роботі адаптивного до варіацій активного опору ротора керування, викликають порушення асимптотичності ідентифікації активного опору ротора, внаслідок чого порушується полеорієнтування, як і в неадаптивній системі при некоректному значенні активного опору ротора. Одночасна адаптація до змін активних опорів статора і ротора є складним науковим завданням, повного вирішення якого дотепер не знайдено.

Таким чином, синтез алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів статора і ротора АД, які дозволяють створювати системи векторного керування, адаптивні до варіацій активних опорів машини, є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2010–2014 років, відповідно до наукового напрямку кафедри «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу» НТУУ «КПІ» та держбюджетної теми «Основи теорії векторно-керованих електромеханічних систем змінного струму з кінематичною парою кочення» № 2511-ф, номер державної реєстрації 0112U002404, в якій автор був співвиконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток методів синтезу систем векторного керування моментом (швидкістю) та потокозчепленням

АД, направлений на підвищення динамічних властивостей і показників енергетичної ефективності електромеханічних систем завдяки наданню їм властивості адаптації до варіацій активних опорів статора і ротора.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються такі основні задачі:

1. Формування задачі адаптивного до варіацій активних опорів статора і ротора керування та обґрунтування необхідності її розв'язування на основі огляду існуючих методів керування координатами АД.

2. Дослідження впливу варіацій активного опору статора на показники якості роботи алгоритмів ідентифікації активного опору ротора АД.

3. Дослідження властивостей робастності до варіацій активного опору статора в існуючих системах векторного керування, робастних до варіацій активного опору ротора.

4. Розвиток методу синтезу алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів статора і ротора АД, які гарантують асимптотичність оцінювання без обмежень на режими роботи АД та не вимагають використання надлишкової параметризації.

5. Удосконалення методу синтезу алгоритмів ідентифікації активних опорів для створення систем, які є простішими за відомі теоретично обґрунтовані рішення для класів технологічних об'єктів, режим роботи яких передбачає періодичні зупинки або роботу зі сталою кутовою швидкістю АД.

6. Теоретичне доведення правомірності використання нелінійного принципу розділення для побудови системи векторного керування, адаптивної до змін активних опорів статора і ротора.

7. Створення комплексу програм для дослідження синтезованих систем адаптивного векторного керування методом математичного моделювання, дослідження динамічних і статичних характеристик запропонованих систем при варіаціях активних опорів.

8. Розробка програмного забезпечення для реалізації алгоритмів керування в реальному часі, експериментальні дослідження динамічних характеристик розроблених систем адаптивного векторного керування.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси у векторно-керованих електромеханічних системах з АД.

Предметом дослідження є системи адаптивного керування на основі алгоритмів ідентифікації активних опорів статора та ротора АД.

Методи дослідження. Під час вирішення поставлених у дисертації задач використовувалися: методи сучасної нелінійної теорії керування такі як: адаптивне керування, другий метод Ляпунова, нелінійний принцип розділення, а також методи математичного моделювання та експериментальних досліджень векторно-керованого асинхронного електроприводу з використанням технології швидкого прототипного тестування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні невідомих раніше структурних властивостей моделі асинхронного електромеханічного перетворювача, які шляхом розширення вектора стану до електричних зарядів дають змогу подолати проблему нелінійної параметризації в рівняннях невимірюваних змінних у задачах синтезу алгоритмів ідентифікації параметрів та адаптивного керування.

Під час виконання дисертаційної роботи було отримано такі наукові результати:

1. Розроблено метод синтезу алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів статора і ротора на основі адаптивного спостерігача потокозчеплення ротора повного порядку з розширеним до електричних зарядів вектором стану, згідно якого рівняння динаміки похибок оцінювання конструюються у формі, в якій невимірювані змінні мають відому похідну, завдяки чому вперше забезпечується локальна асимптотична ідентифікація опорів без використання надлишкової параметризації та без обмежень на режими роботи АД.

2. Удосконалено метод синтезу алгоритмів шляхом перетворення моделі АД до лінійно параметризованої форми та конструювання зворотних зв'язків адаптивних до варіацій активних опорів статора і ротора спостерігачів вектору струму статора, в яких, на відміну від існуючих, не використовується надлишкова параметризація та процедура розімкненого інтегрування. Синтезовані алгоритми на основі інформації про кутову швидкість, струми та напруги статора, а також їх фільтровані похідні, забезпечують локальну експоненційну ідентифікацію активних опорів в умовах повільних змін кутової швидкості ротора та нерухомого ротора, маючи при цьому простішу структуру у порівнянні з існуючими рішеннями.

3. Вперше аналітично доведена правомірність використання нелінійного принципу розділення при конструюванні систем непрямого векторного керування АД, адаптивних до змін активних опорів статора та ротора, що складаються з підсистем регулювання координат та оцінювання опорів, які в ізолюваному стані мають цілеспрямовано досягнуту властивість експоненційної стійкості, що гарантує композитній системі керування механічними координатами та потокозчепленням локальну асимптотичну експоненційну стійкість.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розвитку теоретичної бази для розробки та проектування систем непрямого векторного керування АД з підвищеними динамічними та енергетичними характеристиками, які досягаються завдяки адаптації до варіацій активних опорів статора та ротора.

Під час виконання дисертаційної роботи отримані такі практичні результати:

1. Запропоновано методику дослідження чутливості до варіацій активного опору *статора* алгоритмів ідентифікації активного опору ротора та адаптивних систем векторного керування. Запропонована методика дає змогу оцінити працездатність алгоритмів керування.

2. Синтезовані алгоритми одночасної ідентифікації параметрів АД можуть бути використані для створення, простіших за існуючі, адаптивних систем векторного керування АД, для класів технологічних об'єктів, режим роботи яких передбачає періодичні та короткотривалі зупинки АД або роботу в усталених режимах.

3. Розроблена система адаптивного векторного керування АД забезпечує покращення динамічних і статичних показників якості керування моментом, кутовою швидкістю, а також стабілізацію рівня втрат активної потужності на номінальному рівні в АД в умовах варіацій активних опорів статора і ротора.

4. Вперше експериментально підтверджено, що показники якості керування та енергетичної ефективності запропонованого алгоритму адаптивного векторного керування за наявності обмежених варіацій активних опорів статорного та роторного кіл наближаються до показників якості, які можуть бути отримані для відомих параметрів АД.

5. Створено пакет моделюючих програм для повномасштабного дослідження алгоритмів векторного керування, адаптивних до варіацій активних опорів, який може бути використано у проектуванні електромеханічних систем на основі АД з високими динамічними характеристиками та показниками енергетичної ефективності.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в електромеханічних системах тягового призначення для перспективних моделей тролейбусів і трамвайних вагонів Державним підприємством «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства» (ДП «НДКТІ МГ»), а також використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматизації електромеханічних систем та електроприводу Національного технічного університету України «КПІ» для студентів спеціальності 7.05070204 і 8.05070204 – «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» під час підготовки дипломних проектів і магістерських дисертацій, а також у вивченні дисципліни «Робастне та адаптивне керування в електромеханічних системах».

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок автора. Наукові положення та результати, які викладені в дисертації, отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані у співавторстві, автору належить: в [1] – формулювання задачі адаптивного до варіацій активних опорів статора та ротора векторного керування моментом і потоком, створення адаптивної системи векторного керування на основі нелінійного принципу розділення; в [2] – синтез алгоритму одночасної ідентифікації активних опорів при нерухомому роторі; в [3] – синтез спрощеного алгоритму одночасної ідентифікації активних опорів для випадку постійної кутової швидкості; в [4], [5] – синтез алгоритму одночасної ідентифікації, який асимптотично оцінює активні опори машини без обмежень на режим роботи АД; у [6], [7] – дослідження впливу форми тестових сигналів на швидкодію процесів ідентифікації нерухомого АД; в [8], [9] – експериментальні дослідження системи адаптивного векторного керування АД.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, результати та висновки дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях: XVIII та XIX Міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (м. Одеса, в 2011 р. та смт. Миколаївка, АР Крим, в 2012 р.), II Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, в 2013 р.), XV Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика" (м. Кременчук, в 2014 р.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 9 наукових публікаціях, у тому числі 7 статей у спеціалізованих фахових виданнях України (з них 1 – у виданні, яке включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS) та 2 тези доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 175 сторінок, до якого входить 124 сторінки основного тексту, 51 рисуноків, 147 найменувань використаних джерел та 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі наукового дослідження, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, викладено наукову новизну, практичне значення і реалізацію результатів дисертаційних досліджень, надано дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі проведено аналітичний огляд наукових публікацій в області векторного керування АД. Аналітичний огляд показує, що існуючі алгоритми векторного керування не повною мірою враховують вплив варіації активних опорів АД. В стандартних системах векторного керування моментом (швидкістю) та модулем вектора потокозчеплення ротора зміна активного опору ротора АД призводить до суттєвої деградації показників якості керування та зниження показників енергоефективності процесу електромеханічного перетворення енергії. Існуючі алгоритми робастного керування лише частково вирішують дану проблему в області обмежених варіацій активного опору ротора. Адаптивні до варіацій даного параметру алгоритми керування здатні повністю компенсувати негативний вплив варіацій, але є досить складними в практичній реалізації. Обидва підходи є досить чутливими до варіацій активного опору статора, який, як і активний опір ротора, може змінюватись. Задача векторного керування з одночасною адаптацією до варіацій активних опорів статора і ротора є складним науковим завданням, повне вирішення якого дотепер не знайдено.

На підставі проведеного аналізу зроблено висновок про необхідність розвитку методів синтезу, дослідження та практичної реалізації нових алгоритмів векторного керування АД, які мають властивості одночасної адаптації до варіацій активних опорів статора та ротора, а також є простішими в технічній реалізації за відомі.

У другому розділі проведено аналіз робастності до варіацій опору статора алгоритму робастного векторного керування (РВК) (С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, В.С. Бовкунович, 2010) та теоретично обґрунтованих алгоритмів ідентифікації опору ротора (С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, В.С. Бовкунович, 2010), (R. Marino, S. Peresada, P. Tomei, 1996), які мають 5 та 11 порядок відповідно.

Дослідження виконано з використанням стандартної математичної моделі симетричного АД в стаціонарній системі координат (a-b), яка має наступний вигляд:

$$\dot{\omega} = J^{-1} (M - M_c), \quad M = \mu_1 i^T J \psi, \quad (1)$$

$$\dot{i} = -(\alpha_1 + \alpha_2 \beta L_m) i + \beta \alpha_2 \psi - \beta \omega J \psi + u / \sigma, \quad \dot{\psi} = -\alpha_2 \psi + \omega J \psi + \alpha_2 L_m i, \quad (2)$$

де $i = (i_a, i_b)^T$, $\psi = (\psi_a, \psi_b)^T$, $u = (u_a, u_b)^T$ – вектори струму статора, потокозчеплення ротора та напруги статора; ω – кутова швидкість ротора, M – електромагнітний момент двигуна, M_c – момент навантаження, J – момент інерції ротора. Матриця J дорівнює

$$J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Додатні константи в (1), (2) визначені наступним чином: $\alpha_1 = R_1 / \sigma$, $\alpha_2 = R_2 / L_2$, $\sigma = L_1 (1 - L_m^2 / (L_1 L_2))$, $\beta = L_m / L_2 \sigma$, де R_1, R_2 – активні опори статора та ротора, L_1, L_2 – індуктивності статора та ротора, L_m – індуктивність намагнічування. Одна

пара полюсів в (1), (2) прийнята без втрати загальності.

У всіх тестах, що виконані в роботі, керування двигуном здійснювалось за допомогою системи регулювання швидкості з ПІ-регулятором, в якій досліджувалися внутрішні підсистеми керування моментом та потокозчепленням.

Робастність алгоритмів досліджена шляхом математичного моделювання в умовах стандартного тесту (зростання потоку ротора до номінального значення, розгін ненавантаженого АД до заданої кутової швидкості з подальшим відпрацюванням стрибкоподібного номінального навантаження) для двох значень заданої кутової швидкості $\omega^* = 50$ рад/с та $\omega^* = 5$ рад/с.

В якості досліджуваного використано стандартний АД типу 4АО80В2 потужністю 0.75 кВт, який має номінальні данні: момент 2.5 Н·м, швидкість 300 рад/с, активні опори та індуктивності статора та ротора $R_1 = 11$ Ом, $R_2 = 5.51$ Ом, $L_1 = L_2 = 0.95$ Гн, індуктивність контуру намагнічування $L_m = 0.91$ Гн, повний момент інерції $J = 0.0036$ кг·м². Варіації активного опору статора задавались лише в рівняннях досліджуваного алгоритму керування, в якому замість номінального значення параметру α_{1N} (пропорційного опору статора) використовувались значення $0.7\alpha_{1N}$ та $1.3\alpha_{1N}$.

На першому етапі в результаті дослідження робастності алгоритму РВК встановлено, що асимптотичність відпрацювання потокозчеплення порушується, але система залишалася стійкою. Похибки відпрацювання потокозчеплення не перевищують 10% від номінального значення в статичних режимах. Виходячи з теорії адаптивних систем, встановлені властивості одночасної робастності до варіацій активних опорів машини відкривають можливість використання алгоритму РВК для побудови систем векторного керування, адаптивних до варіацій активних опорів статора і ротора АД.

На другому етапі досліджено властивості робастності алгоритмів ідентифікації 5-го та 11-го порядку в автономному режимі роботи (рис. 1), тобто процеси ідентифікації не впливали на процеси в системі керування з алгоритмом РВК, в якому встановлені номінальні параметри. Початкове значення для активного опору ротора в алгоритмах ідентифікації прийнято вдвічі більшим за номінальне, тобто $\hat{\alpha}_2(0) = 2\alpha_{2N}$. Дослідження виконано для двох значень параметра α_1 в алгоритмах ідентифікації $\alpha_1 = 0.7\alpha_{1N}$ та $\alpha_1 = 1.3\alpha_{1N}$.

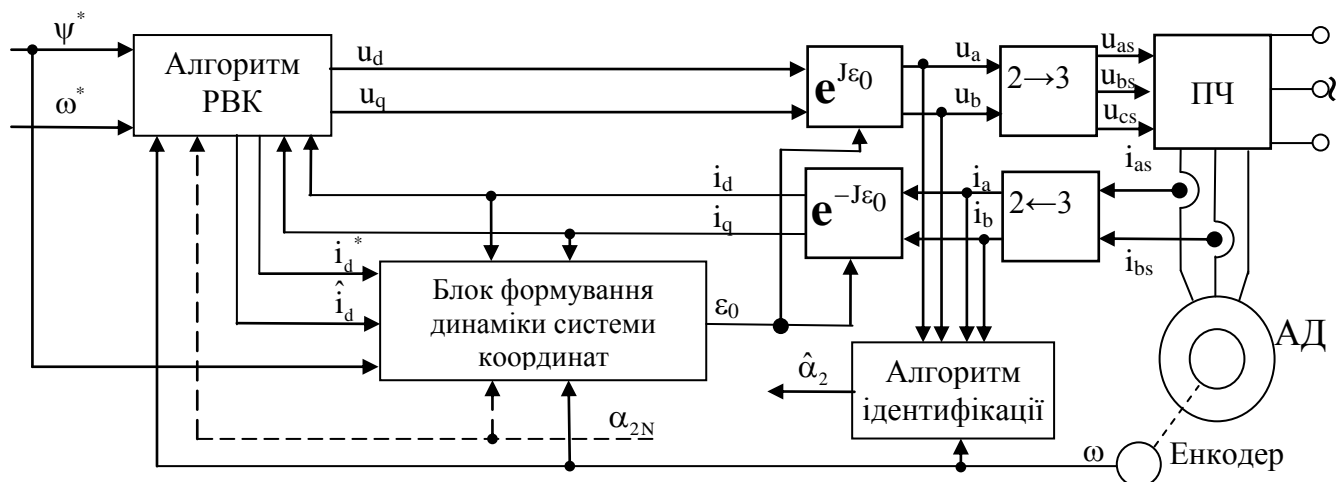


Рис. 1. Функціональна схема системи, що досліджується, для автономної роботи алгоритмів ідентифікації

При роботі АД з кутовою швидкістю $\omega = 5$ рад/с (1.67% від номінальної швидкості) алгоритм 11-го порядку можна вважати непрацездатним, оскільки значні похибки ідентифікації активного опору (більше 30%) унеможливають його використання в адаптивній системі векторного керування.

На рис. 2 показано статичні залежності відносних похибок ідентифікації $\tilde{\alpha}_2 / \alpha_{2N}$ та оцінювання модуля потокозчеплення ротора $\tilde{\psi} / \psi_N$ при зміні $\alpha_1 \in (0.5\alpha_{1N} \div 1.5\alpha_{1N})$ для алгоритму 5-го порядку при роботі АД з номінальним навантаженням $M_c = 2.5$ Н·м для двох значень кутової швидкості $\omega = 50$ рад/с та $\omega = 5$ рад/с.

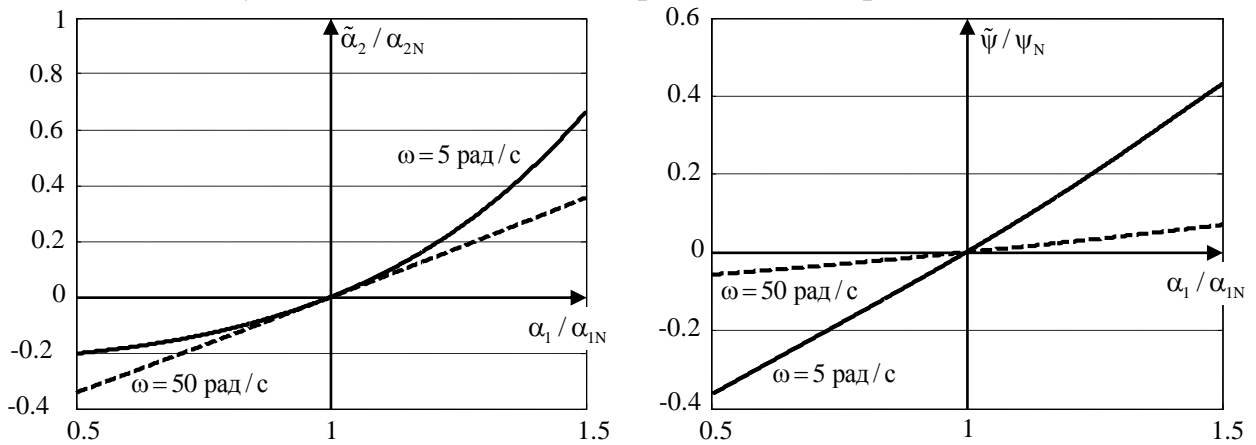


Рис. 2. Залежності похибок ідентифікації та оцінювання від змін активного опору статора для алгоритму 5-го порядку

Як видно з рис. 2, варіації активного опору статора призводять до порушення асимптотичності ідентифікації активного опору ротора та оцінювання модуля потокозчеплення ротора, причому більш критичними є режими роботи з низькою кутовою швидкістю.

Отримані результати підтверджують, що системи векторного керування, адаптивні до варіацій активного опору ротора, суттєво деградують в умовах варіацій активного опору статора.

У третьому розділі розроблено та удосконалено методи синтезу алгоритмів ідентифікації параметрів, з використанням яких синтезовано алгоритми одночасної ідентифікації активних опорів статора і ротора для наступних режимів роботи АД: при нерухомому роторі (активна ідентифікація під час технологічних зупинок), при роботі з постійною кутовою швидкістю, а також роботі з довільною обмеженою траєкторією кутової швидкості.

Синтезовано два нових алгоритми п'ятого порядку для одночасної ідентифікації активних опорів статора і ротора при нерухомому роторі. Теоретично доведено, що при виконанні умов персистентності збудження ідентифіковані значення активних опорів статора та ротора експоненційно прямують до своїх дійсних значень. Результати математичного моделювання та експериментального тестування підтверджують високу швидкодію синтезованих алгоритмів.

Удосконалено метод синтезу алгоритмів ідентифікації шляхом використання спеціальних перетворень моделі АД до лінійно праметризованої форми при постійній кутовій швидкості ротора. Завдяки чому було синтезовано новий алгоритм ідентифікації параметрів α_1 та α_2 , що має найменший порядок з усіх відомих теоретично

обґрунтованих рішень для режиму роботи двигуна з постійною кутовою швидкістю. Його рівняння мають вигляд

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{i}} &= \mathbf{f}_1 + \hat{\alpha}_1 \mathbf{f}_2 + \hat{\alpha}_2 \mathbf{f}_3 + \hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 \mathbf{f}_4 + k_1 \tilde{\mathbf{i}}, \quad \dot{\hat{\alpha}}_1 = \gamma_1 \tilde{\mathbf{i}}^T (\mathbf{f}_2 + \hat{\alpha}_2 \mathbf{f}_4), \\ \dot{\hat{\alpha}}_2 &= \gamma_2 \tilde{\mathbf{i}}^T (\mathbf{f}_3 + \hat{\alpha}_1 \mathbf{f}_4), \quad \dot{\mathbf{i}}_0 = \mathbf{i} - \mathbf{c} \mathbf{i}_0, \quad \dot{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{u} - \mathbf{c} \mathbf{u}_0, \\ \mathbf{f}_1 &= \mathbf{c} \mathbf{i}_1 + (1/\sigma) \mathbf{u}_1 + \omega \mathbf{J}(\mathbf{i}_1 - (1/\sigma) \mathbf{u}_0), \quad \mathbf{f}_2 = \omega \mathbf{J} \mathbf{i}_0 - \mathbf{i}_1, \\ \mathbf{f}_3 &= (1/\sigma) \mathbf{u}_0 - (1 + L_m \beta) \mathbf{i}_1, \quad \mathbf{f}_4 = -\mathbf{i}_0, \quad \mathbf{i}_1 = \mathbf{i} - \mathbf{c} \mathbf{i}_0, \quad \mathbf{u}_1 = \mathbf{u} - \mathbf{c} \mathbf{u}_0,\end{aligned}\tag{4}$$

де $\hat{\mathbf{i}} = (\hat{i}_a, \hat{i}_b)^T$ та $\tilde{\mathbf{i}} = (\tilde{i}_a, \tilde{i}_b)^T$ – вектори оцінок та похибок оцінювання струму статора; $\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2$ – оцінені значення параметрів α_1, α_2 ; $k_1 > 0, \gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0, c > 0$ – коефіцієнти налаштування спостерігача.

Синтезований алгоритм (4) складається з 8 диференціальних рівнянь, чотири з яких є аперіодичними фільтрами першого порядку, містить чотири додатних параметра налаштування: $c, k_1, \gamma_1, \gamma_2$; його входами є струм статора \mathbf{i} , напруга статора \mathbf{u} та кутова швидкість ω , а виходами – оцінені значення $\hat{\alpha}_1$ і $\hat{\alpha}_2$ параметрів α_1 і α_2 , відповідно. Алгоритм не містить процедури розімкненого інтегрування та є простим в реалізації. При виконанні умов персистентності збудження та постійній кутовій швидкості ротора гарантується локальна асимптотична ідентифікація активних опорів статора і ротора.

Розроблено метод синтезу алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів статора і ротора на основі адаптивного спостерігача потокозчеплення повного порядку з розширенням до електричних зарядів вектором стану. Завдяки конструюванню рівнянь динаміки похибок оцінювання потокозчеплення у формі, в якій невимірювані змінні мають відомі похідні, вперше забезпечується локальна асимптотична ідентифікація опорів без використання надлишкової параметризації.

На основі моделі електричної частини АД (2) сформовано адаптивний спостерігач у вигляді

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{i}} &= -\hat{\alpha}_2 \beta L_m \mathbf{i} + \beta \hat{\alpha}_2 \boldsymbol{\eta} - \beta \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\eta} + \mathbf{u} / \sigma + k_1 \tilde{\mathbf{i}} + \mathbf{v}, \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= -\hat{\alpha}_2 \boldsymbol{\eta} + \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\eta} + \hat{\alpha}_2 L_m \mathbf{i} - (k_2 / \beta) \tilde{\mathbf{i}} - (1/\beta) \mathbf{v},\end{aligned}\tag{5}$$

де $\mathbf{v} = (v_a, v_b)^T$ – вектор, який буде синтезовано пізніше; $\boldsymbol{\eta} = (\eta_a, \eta_b)^T$ – додаткові змінні, які необхідні для визначення потокозчеплення; $k_1 > 0$ та $k_2 > 0$ – коефіцієнти налаштування спостерігача.

Після визначення похибок оцінювання $\tilde{\mathbf{i}} = \mathbf{i} - \hat{\mathbf{i}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\eta} - \hat{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\alpha}_2 = \alpha_2 - \hat{\alpha}_2$ рівняння динаміки похибок оцінювання запишуться

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{\mathbf{i}}} &= -\alpha_1 \tilde{\mathbf{i}} + \beta \alpha_2 \tilde{\boldsymbol{\eta}} + \tilde{\alpha}_2 \beta \boldsymbol{\eta} - \tilde{\alpha}_2 \beta L_m \mathbf{i} - \beta \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\eta} - k_1 \tilde{\mathbf{i}} - \mathbf{v}, \\ \dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} &= -\alpha_2 \tilde{\boldsymbol{\eta}} - \tilde{\alpha}_2 \boldsymbol{\eta} + \omega \mathbf{J} \tilde{\boldsymbol{\eta}} + \tilde{\alpha}_2 L_m \mathbf{i} + (k_2 / \beta) \tilde{\mathbf{i}} + (1/\beta) \mathbf{v}.\end{aligned}\tag{6}$$

Ідея побудови алгоритму ідентифікації для системи (6) полягає в синтезі сигналів v_a та v_b , а також динамічної поведінки оцінок $\hat{\alpha}_1$ і $\hat{\alpha}_2$ таким чином, щоб \tilde{i}_a, \tilde{i}_b асимптотично збігалися в нуль. Для досягнення цієї мети введено динамічне перетворення координат

$$\mathbf{z} = \tilde{\mathbf{i}} + \beta \tilde{\boldsymbol{\eta}} + \alpha_1 \boldsymbol{\xi}, \quad (7)$$

де

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{i}. \quad (8)$$

Сформуємо корегуючі сигнали v_a та v_b у вигляді

$$\mathbf{v} = -\hat{\alpha}_1 \mathbf{i} - \omega \mathbf{J} \hat{\mathbf{z}} - \hat{\alpha}_1 \hat{\alpha}_2 \boldsymbol{\xi} + \hat{\alpha}_1 \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\xi}, \quad (9)$$

де $\hat{\mathbf{z}}$ – оцінка вектору \mathbf{z} .

Визначивши похибки оцінювання $\tilde{\alpha}_1 = \alpha_1 - \hat{\alpha}_1$, $\tilde{\mathbf{z}} = \mathbf{z} - \hat{\mathbf{z}}$, рівняння (6), з врахуванням (9), запишуться у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{i}}} &= -(k_1 + \alpha_2) \tilde{\mathbf{i}} + \alpha_2 \mathbf{z} + \omega \mathbf{J} \tilde{\mathbf{i}} - \omega \mathbf{J} \tilde{\mathbf{z}} - \tilde{\alpha}_1 (\mathbf{i} + \hat{\alpha}_2 \boldsymbol{\xi} - \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\xi}) + \\ &+ \tilde{\alpha}_2 (\beta \boldsymbol{\eta} - \beta L_m \mathbf{i} - \hat{\alpha}_1 \boldsymbol{\xi}) - \tilde{\alpha}_1 \tilde{\alpha}_2 \boldsymbol{\xi}, \\ \dot{\tilde{\mathbf{z}}} &= -(k_1 - k_2) \tilde{\mathbf{i}}. \end{aligned} \quad (10)$$

При розгляді частково-лінійної апроксимації (10) було знехтувано квадратичною компонентою $\tilde{\alpha}_1 \tilde{\alpha}_2 \boldsymbol{\xi}$.

Для визначення законів ідентифікації $\hat{\alpha}_1$, $\hat{\alpha}_2$, а також динамічної поведінки оцінки $\hat{\mathbf{z}}$, розглянемо наступну додатньо-визначену функцію ($\gamma_i > 0$, $i = 1, 2, \dots, 4$, $\gamma_1 = k_1 - k_2$):

$$V = (1/2) [\tilde{\mathbf{i}}^T \tilde{\mathbf{i}} + (\alpha_2 / \gamma_1) \mathbf{z}^T \mathbf{z} + (1 / \gamma_2) \tilde{\mathbf{z}}^T \tilde{\mathbf{z}} + (1 / \gamma_3) \tilde{\alpha}_1^2 + (1 / \gamma_4) \tilde{\alpha}_2^2]. \quad (11)$$

В роботі доведено, що при конструюванні оцінок у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{z}}} &= \tilde{\mathbf{z}} - \dot{\tilde{\mathbf{z}}} = -\gamma_2 \omega \mathbf{J} \tilde{\mathbf{i}}, \\ \dot{\tilde{\alpha}}_1 &= -\dot{\hat{\alpha}}_1 = \gamma_3 \tilde{\mathbf{i}}^T (\mathbf{i} + \hat{\alpha}_2 \boldsymbol{\xi} - \omega \mathbf{J} \boldsymbol{\xi}), \\ \dot{\tilde{\alpha}}_2 &= -\dot{\hat{\alpha}}_2 = -\gamma_4 \tilde{\mathbf{i}}^T (\beta \boldsymbol{\eta} - L_m \beta \mathbf{i} - \hat{\alpha}_1 \boldsymbol{\xi}), \end{aligned} \quad (12)$$

похідна V в силу рівнянь (10) буде

$$\dot{V} = -(k_1 + \alpha_2) \tilde{\mathbf{i}}^T \tilde{\mathbf{i}}. \quad (13)$$

Повні рівняння алгоритму ідентифікації активних опорів статора і ротора задаються виразами (5), (8), (9) та (12), вони описують нелінійну динамічну систему десятого порядку.

Система (10), (12) може бути записана в стандартній для адаптивних систем формі

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}(t) \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{W}(t) \tilde{\mathbf{p}}, \\ \dot{\tilde{\mathbf{p}}} &= -\Lambda \mathbf{W}^T(t) \tilde{\mathbf{x}}, \end{aligned} \quad (14)$$

де $\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{i}}$, $\tilde{\mathbf{p}} = (\mathbf{z}^T, \tilde{\mathbf{z}}^T, \tilde{\boldsymbol{\alpha}}^T)^T$, $\Lambda = \text{diag}(\alpha_2 \gamma_1, \alpha_2 \gamma_1, \gamma_2, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4)$, $\gamma_1 = k_1 - k_2 > 0$, $\mathbf{W}(t)$ – матриця регресії.

З використанням теореми про персистентність збудження доведено, що положення рівноваги системи (10), (12) $\tilde{\mathbf{i}} = 0$, $\tilde{\mathbf{z}} = 0$, $(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = 0$ є локально експоненційно стійким (завдяки нехтуванню квадратичною складовою $\tilde{\alpha}_1 \tilde{\alpha}_2 \boldsymbol{\xi} = 0$), якщо

виконуються умови персистентності збудження $\int_t^{t+T} \mathbf{W}(\tau) \mathbf{W}^T(\tau) d\tau \geq c \mathbf{I} > 0 \forall t \geq 0, T > 0$.

Таким чином, алгоритм ідентифікації (5), (8), (9), (12) є адаптивним спостерігачем,

який асимптотично оцінює вектори струму статора, потокозчеплення ротора, а також параметри α_1 і α_2 , пропорційні активним опорам статора і ротора. Умови персистентності збудження задовольняються для всіх режимів роботи АД, коли в роторному колі протікає струм.

Алгоритм ідентифікації (5), (8), (9), (12) містить п'ять додатних параметрів налаштування: $k_1, k_2, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$; його входами є $\omega, \mathbf{u}, \mathbf{i}$, виходами – оцінені значення $\hat{\alpha}_1$ і $\hat{\alpha}_2$ параметрів α_1 і α_2 , відповідно. Синтезований алгоритм десятого порядку є простішим у порівнянні з відомими теоретично обґрунтованими рішеннями для довільної кутової швидкості, які мають одинадцятий порядок і вище.

Працездатність кожного з синтезованих алгоритмів ідентифікації підтверджена результатами математичного моделювання.

У четвертому розділі представлено проектування адаптивної до варіацій активних опорів статора та ротора системи непрямого векторного керування моментом та потоком АД. Використовуючи нелінійний принцип розділення на основі алгоритму РВК, необхідні властивості робастності якого було встановлено в розділі 2, та алгоритму ідентифікації активних опорів статора та ротора (5), (8), (9), (12), синтезованого в розділі 3, сконструйовано композитну адаптивну систему.

Адаптивне керування на основі принципу розділення передбачає використання оціненого значення вектору $\hat{\alpha} = (\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2)^T$ в алгоритмі РВК. Для цього постійне значення $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)^T$ в алгоритмі РВК замінюється на його оцінку $\hat{\alpha} = (\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2)^T$, яка формується адаптивним спостерігачем (5), (8), (9), (12).

В роботі доведено, що, при такій побудові адаптивної системи векторного керування моментом та потокозчепленням АД, рівняння динаміки похибок відпрацювання і оцінювання в композитній системі набувають вигляду

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_p &= \mathbf{A}_p(t)\mathbf{x}_p + \mathbf{W}_p(t)\tilde{\alpha} + \Phi(\tilde{\mathbf{i}}_d, \tilde{\mathbf{i}}_q, \tilde{\mathbf{i}}_d^*)\tilde{\alpha}, \\ \dot{\tilde{\alpha}} &= -\Gamma\mathbf{W}_{i(a-b)}^T \left(\mathbf{J}\tilde{\alpha}\xi^T, \mathbf{z}, \tilde{\mathbf{i}}, \tilde{\mathbf{i}}_{(d-q)}, \tilde{\psi}, \mathbf{f}_{1(a-b)}^*, \mathbf{f}_{2(a-b)}^* \right) \mathbf{x}_i, \\ \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{A}_i(t)\mathbf{x}_i + \mathbf{W}_{i(a-b)} \left(\mathbf{J}\tilde{\alpha}\xi^T, \mathbf{z}, \tilde{\mathbf{i}}, \tilde{\mathbf{i}}_{(d-q)}, \tilde{\psi}, \mathbf{f}_{1(a-b)}^*, \mathbf{f}_{2(a-b)}^* \right) \tilde{\alpha},\end{aligned}\quad (15)$$

де $\mathbf{x}_p = \left(\tilde{\mathbf{i}}_d, z_d, \tilde{\mathbf{i}}_q, z_q, \tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q, \tilde{\mathbf{i}}_d^* \right)^T$ – вектор похибок відпрацювання в підсистемі регулювання моменту та потокозчеплення; $\tilde{\mathbf{i}}_d = \mathbf{i}_d - \mathbf{i}_d^*, \tilde{\mathbf{i}}_q = \mathbf{i}_q - \mathbf{i}_q^*$ – похибки відпрацювання струму статора в синхронній системі координат; $\mathbf{i}_d, \mathbf{i}_q, \mathbf{i}_d^*, \mathbf{i}_q^*$ – дійсні значення та завдання струму статора в системі координат (d-q); z_d, z_q – інтегральні компоненти регуляторів струму; $\tilde{\mathbf{i}}_d^* = \mathbf{i}_d - \hat{\mathbf{i}}_d, \hat{\mathbf{i}}_d$ – похибка оцінювання та оцінка полюсової компоненти струму статора; $\tilde{\psi}_d = \psi_d - \psi_d^*, \tilde{\psi}_q = \psi_q - \psi_q^*$ – похибки відпрацювання потоку; $\tilde{\psi} = (\tilde{\psi}_d, \tilde{\psi}_q)$; $\mathbf{x}_i = \left(\tilde{\mathbf{i}}^T, \mathbf{z}^T, \tilde{\mathbf{z}}^T \right)^T$ – вектор похибок оцінювання в системі ідентифікації; $\tilde{\mathbf{i}}_{(d-q)} = \left(\tilde{\mathbf{i}}_d, \tilde{\mathbf{i}}_q \right)$ – вектор похибок оцінювання струму в системі координат (d-q); $\Gamma = \text{diag}(\gamma_3, \gamma_4)$; $\mathbf{f}_{1(a-b)}^* = -e^{J\epsilon_0}\mathbf{i}^* + (-\alpha_2\mathbf{I} + \omega\mathbf{J})\xi$,

$$\mathbf{f}_{2(a-b)}^* = \beta e^{J_{\varepsilon_0}} (\boldsymbol{\psi}^* - L_m \mathbf{i}^*);$$

$$\mathbf{W}_p^T(t) = \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_d^* & 0 & -\mathbf{i}_q^* & 0 & 0 & 0 & -\mathbf{i}_d^* \\ \beta(\boldsymbol{\psi}^* - L_m \mathbf{i}_d^*) & 0 & -\beta L_m \mathbf{i}_q^* & 0 & -(\boldsymbol{\psi}^* - L_m \mathbf{i}_d^*) & L_m \mathbf{i}_q^* & \beta(\boldsymbol{\psi}^* - L_m \mathbf{i}_d^*) \end{bmatrix}; \quad \tilde{\boldsymbol{\alpha}} = \boldsymbol{\alpha} - \hat{\boldsymbol{\alpha}};$$

$\boldsymbol{\psi}^* = (\psi^*, 0); \mathbf{i}^* = (i_d^*, i_q^*); \mathbf{A}_p(t), \mathbf{A}_i(t), \mathbf{W}_{i(a-b)}, \boldsymbol{\Phi}^T(\tilde{i}_d, \tilde{i}_q, \tilde{i}_d)$ – матриці відповідних розмірностей.

Частково лінеаризована в околі положення рівноваги $\mathbf{x}_p = \mathbf{0}, \mathbf{x}_i = \mathbf{0}, \tilde{\boldsymbol{\alpha}} = \mathbf{0}$ система (15) (при нехтуванні квадратичними складовими) має наступну стандартну форму

$$\dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p(t) \mathbf{x}_p + \mathbf{W}_p(t) \tilde{\boldsymbol{\alpha}}, \quad (16)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\alpha}}} = -\Gamma \mathbf{F}_{(a-b)}^{*T}(t) \mathbf{x}_i, \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}_i(t) \mathbf{x}_i + \mathbf{F}_{(a-b)}^*(t) \tilde{\boldsymbol{\alpha}},$$

$$\text{де } \mathbf{F}_{(a-b)}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1(a-b)}^* & \mathbf{f}_{2(a-b)}^* \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} & \mathbf{0}_{4 \times 1} \end{bmatrix}.$$

В підсистемі регулювання координат АД (16) матриця $\mathbf{W}_p(t)$ є обмеженою, в підсистемі ідентифікації (17) матриця регресії $\mathbf{F}_{(a-b)}^*(t)$ є також обмеженою, оскільки вони лінійно залежать від обмежених завдань ψ^*, i_d^*, i_q^* . За цих умов стійкість композитної системи (16), (17) доводиться наступним чином.

Лінеаризована підсистема ідентифікації (17) є глобально експоненційно стійкою при виконанні умов персистентності збудження. Оскільки номінальна динаміка підсистеми відпрацювання моменту-потoku $\dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p(t) \mathbf{x}_p$ є глобально експоненційно стійкою, то положення рівноваги $\mathbf{x}_p = \mathbf{0}, \mathbf{x}_i = \mathbf{0}, \tilde{\boldsymbol{\alpha}} = \mathbf{0}$ композитної системи (16), (17), також є експоненційно стійким, тому що дві підсистеми включені послідовно за допомогою обмеженої матриці $\mathbf{W}_p(t)$.

Таким чином, з глобальної експоненційної стійкості лінеаризованої композитної системи (16), (17) впливає локальна експоненціальна стійкість вихідної системи (15), тобто, при виконанні умов персистентності збудження, гарантується локальне асимптотичне відпрацювання заданих траєкторій моменту і потоку, а також оцінювання вектору $\boldsymbol{\alpha}$. Додатково адаптивний спостерігач асимптотично оцінює компоненти векторів струму статора і потокозчеплення ротора.

Доведення локальної експоненційної стійкості адаптивної системи (15) встановлює правомірність використання нелінійного принципу розділення для композитної системи, яка складається з глобально експоненційно стійкої підсистеми РВК та локально експоненційно стійкого адаптивного спостерігача (5), (8), (9), (12).

Адаптивну систему векторного керування було досліджено шляхом математичного моделювання в умовах стандартного тесту розгону ненавантаженого двигуна до заданого значення кутової швидкості з подальшим відпрацюванням стрибкоподібного номінального навантаження. Результати дослідження перехідних процесів підтверджують, що в адаптивній системі забезпечується компенсація негативного впливу варіацій ротора в діапазоні від 50% до 200% відносно номінального значення

при зміні активного опору статора в діапазоні від 80% до 120%.

Для демонстрації ефективності синтезованої системи керування було проведено тест при наступній послідовності операцій керування: на інтервалі часу $t = 0 \div 0.3$ с задане значення потокозчеплення $\psi^*(t)$ збільшується від 0.02 Вб до свого номінального значення 0.9 Вб, на інтервалі часу $t = 0.6 \div 0.7$ с відбувається розгін двигуна до кутової швидкості 50 рад/с. Навантаження прикладається на інтервалах часу $t = 1.2 \div 2.5$ с та $t = 3 \div 3.5$ с. Початкові умови алгоритму ідентифікації при цьому були $\hat{\alpha}_1(0) = 0.8\alpha_{1N}$, $\hat{\alpha}_2(0) = 2\alpha_{2N}$. Динамічна поведінка адаптивної системи в умовах тесту показана на рис. 3.

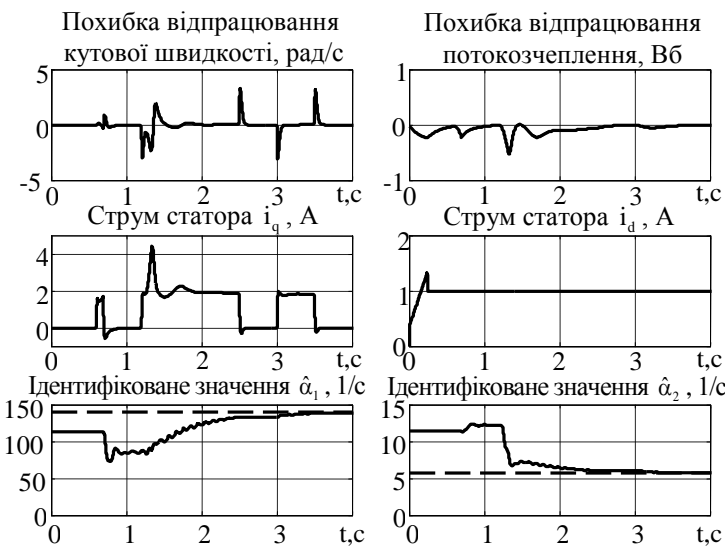


Рис. 3. Динамічні процеси в адаптивній системі керування (моделювання)

Налаштування підсистеми ідентифікації (5), (8), (9), (12) виконано наступним чином: $k_1 = 200$, $k_2 = 190$, $\gamma_2 = \gamma_3 = 1$, $\gamma_4 = 14$.

Як видно з рис. 3, під час першого накидання моменту навантаження протягом $t = 1.2 \div 2.5$ с ідентифікація опорів статора і ротора в системі ще не завершилась, присутні похибки оцінювання, тому відпрацювання кутової швидкості та потокозчеплення відбувається з суттєвими динамічними похибками. При повторному накиданні моменту навантаження ($t = 3 \div 3.5$ с), коли

адаптивний спостерігач завершив оцінювання активних опорів статора і ротора, показники якості регулювання кутової швидкості суттєво покращуються у порівнянні з попереднім накиданням моменту та відповідають роботі системи з коректними значеннями активних опорів. Таким чином показано, що синтезована система векторного керування з одночасною адаптацією до активних опорів статора і ротора компенсує вплив їх варіацій і завдяки цьому підвищує показники якості регулювання кутової швидкості (моменту) та потоку АД.

У п'ятому розділі представлено результати експериментального тестування розроблених структур адаптивного векторного керування асинхронним двигуном. Експериментальні дослідження виконано на станції швидкого прототипного тестування алгоритмів керування електроприводом, функціональна схема якої показана на рис. 4.

До складу станції входять: керуючий контролер на основі 32-х розрядного цифрового сигнального процесора з плаваючою точкою, в якому реалізуються досліджувані алгоритми; трифазний інвертор 20А/380В з частотою ШІМ 10 кГц; персональний комп'ютер (ПК), призначений для програмування, налагодження та візуалізації перехідних процесів; досліджуваний АД типу 4АО80В2 потужністю 0.75 кВт, параметри якого представлені в розділі 2. В якості навантаження використовується двигун постійного струму (ДПС) зі струмовим керуванням. Такт

квантування при цифровій реалізації алгоритмів керування складав 200мкс.

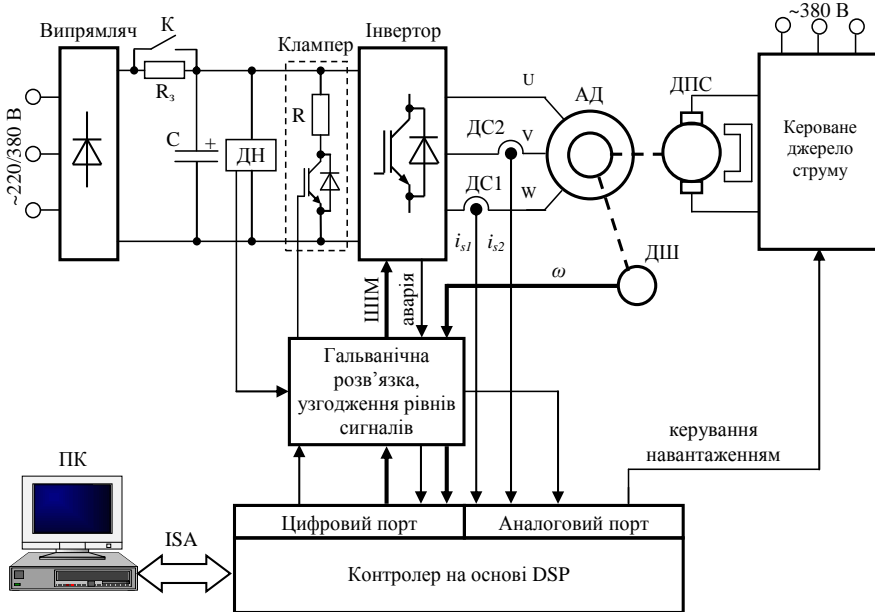


Рис. 4. Функціональна схема лабораторної установки

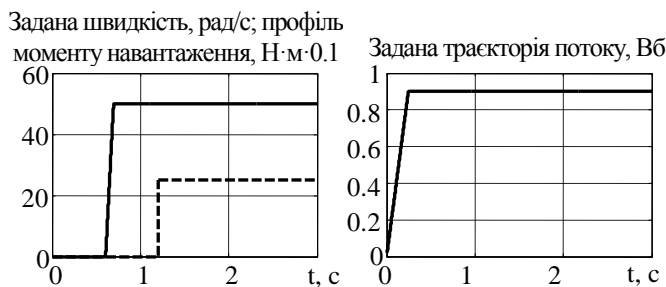


Рис. 5. Задані траєкторії швидкості, потоку та профіль моменту навантаження

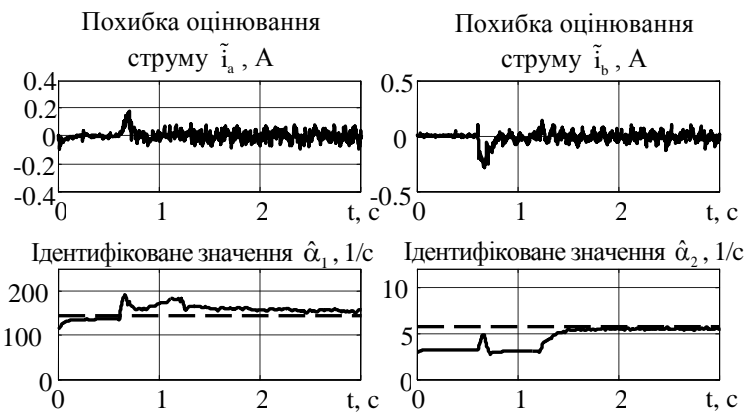


Рис. 6. Перехідні процеси під час роботи алгоритму (4) в автономному режимі

систему було налаштовано наступним чином. В підсистемах ідентифікації та керування було зафіксовано значення параметру, пропорційного активному опору статора, на рівні $\hat{\alpha}_1 = 0.6\alpha_{1N} = \text{const}$, $\hat{\alpha}_2(0) = 2\alpha_2$. При цьому значення параметра α_1 в двигуні незмінне. Таким чином досліджується робота системи векторного керування, яка є адаптивною до варіацій активного опору ротора, в умовах неточної інформації про активний опір

Параметри налаштування підсистеми керування були такі ж як у дослідженнях розділу 4. Налаштування алгоритму ідентифікації (4) виконано у відповідності до: $c = 100$, $k_1 = 200$, $\gamma_1 = 100$, $\gamma_2 = 10$. При дослідженні використовувалась послідовність операцій керування, яка показана на рис. 5, початкові умови $\hat{\alpha}_1(0) = 0.8\alpha_{1N}$, $\hat{\alpha}_2(0) = 0.5\alpha_{2N}$.

Графіки перехідних процесів показано на рис. 6 та рис. 7 при автономній роботі алгоритму ідентифікації (4) та у складі адаптивної системи.

Перехідні процеси, представлені на рис. 6 та рис. 7, підтверджують здатність алгоритму ідентифікації (4) забезпечити адаптацію до варіацій активних опорів статора та ротора.

Експериментальне дослідження адаптивної системи векторного керування з алгоритмом ідентифікації (5), (8), (9), (12), синтезованої в 4-му розділі, виконано в три етапи.

На першому етапі з метою демонстрації недосконалості роботи систем векторного керування, адаптивних до варіацій лише активного опору ротора в умовах одночасної варіації активних опорів статора та ротора, адаптивну

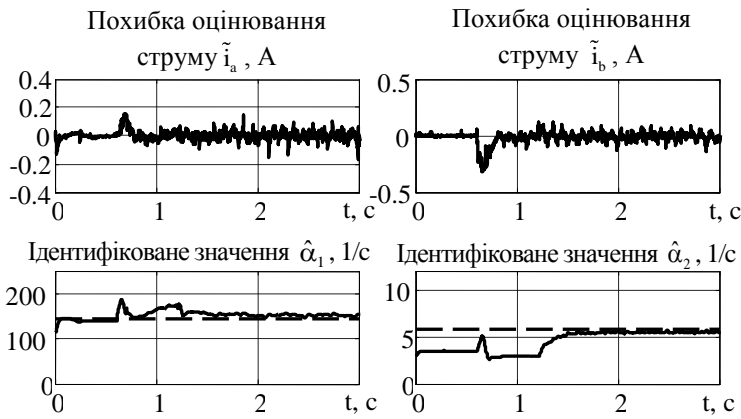


Рис. 7. Перехідні процеси в адаптивній системі з алгоритмом (4)

визначалась як різниця оціненого (за допомогою розімкнутого спостерігача зниженого порядку з коректними значеннями параметрів) та заданого значення потокозчеплення.

На рис. 8 представлено результати експериментального дослідження адаптивної системи для кутової швидкості $\omega^* = 50$ рад/с.

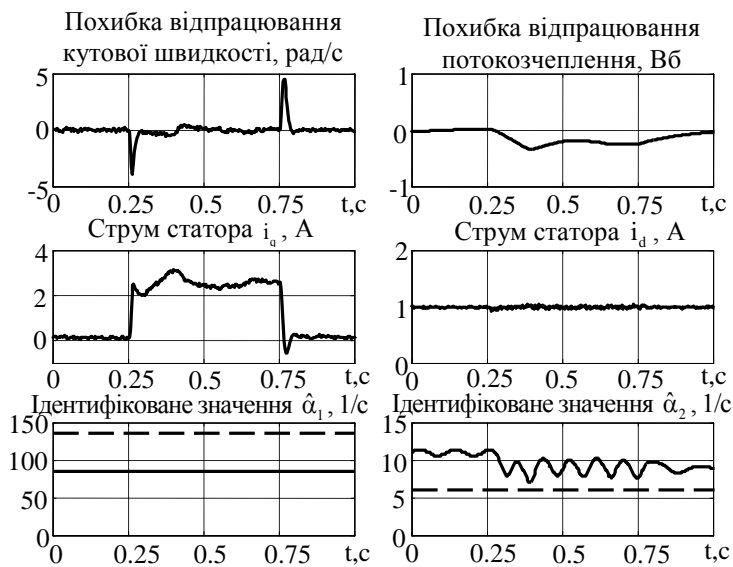


Рис. 8. Динамічні процеси для фіксованого $\hat{\alpha}_1 = 0.6\alpha_1$

керування. Керування АД здійснювалось за допомогою алгоритму РВК з відомими та постійними параметрами, а оцінені та ідентифіковані за допомогою підсистеми ідентифікації (5), (8), (9), (12) значення змінних та параметрів АД використовувались лише для оцінки якості її роботи. Коефіцієнти налаштування системи на другому етапі були такі самі, як при дослідженні шляхом математичного моделювання,

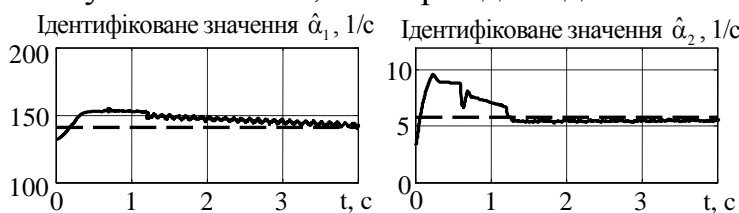


Рис. 9. Динамічні процеси ідентифікації активних опорів під час автономної роботи алгоритму (5), (8), (9), (12)

статора.

Після завершення процесу ідентифікації α_2 (з похибкою, обумовленою неточністю інформації про активний опір статора в керуючому контролері) на проміжку часу $t = 0.25 \div 0.75$ с до валу двигуна прикладається постійний момент навантаження, близький до номінального. В умовах всіх тестів похибка регулювання модуля потокозчеплення

Як видно з графіків перехідних процесів через наявність варіації активного опору статора усталене значення $\hat{\alpha}_2$ відрізняється від реального приблизно на 60% та має коливальний характер, погіршуються показники якості регулювання, що проявляється у підвищеній коливальності процесів та завищеному значенні моментного струму i_q , в результаті цього активні втрати в АД збільшуються.

На другому етапі досліджувалась автономна робота підсистем ідентифікації та описаного в розділі 4.

Перехідні процеси в підсистемі ідентифікації параметрів α_1, α_2 при початкових умовах $\hat{\alpha}_1(0) = 0.8\alpha_{1N}$, $\hat{\alpha}_2(0) = 0.5\alpha_{1N}$ показано на рис. 9.

Ідентифіковані значення

активних опорів статора і ротора прямують до своїх дійсних значень. Ідентифіковане значення параметра $\hat{\alpha}_2$ після завершення перехідних процесів дорівнює $0.95\alpha_{2N}$, що пояснюється впливом неідеальностей інвертора.

На третьому етапі досліджувалась робота адаптивної системи. Результати експериментального тестування (рис. 10) співпадають з результатами

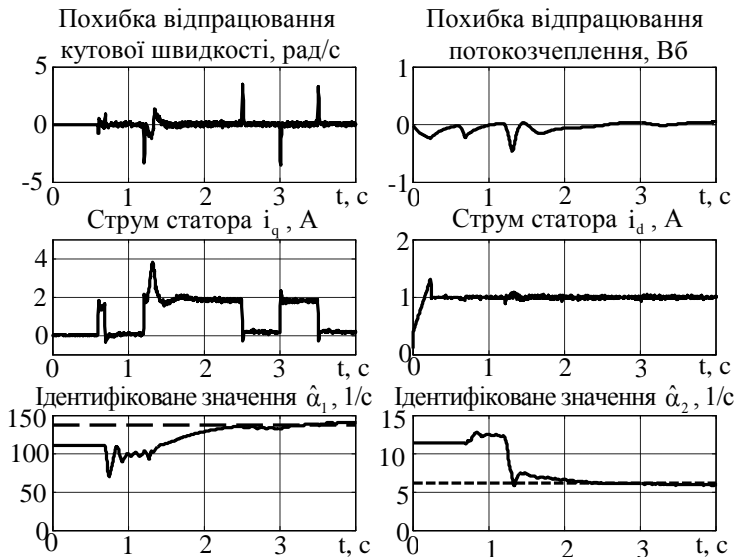


Рис. 10. Динамічні процеси в адаптивній системі векторного керування

математичного моделювання, показаними на рис 3. При виконанні тесту послідовність операцій керування була ідентична дослідженню адаптивної системи шляхом моделювання (рис. 3).

Як видно з графіків перехідних процесів, показаних на рис. 10, ідентифіковані значення параметрів співпадають зі значеннями, отриманими при автономній роботі підсистеми ідентифікації. Таким чином експериментально підтверджено, що синтезована система векторного керування з одночасною адаптацією до змін

активних опорів статора і ротора компенсує негативний вплив їх варіацій і завдяки цьому підвищує показники якості регулювання кутової швидкості (моменту) та потоку асинхронного двигуна, а також енергетичну ефективність процесів електромеханічного перетворення енергії.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримала подальший розвиток теорія векторного керування АД і на цій основі розв'язана актуальна науково-технічна задача розвитку методів синтезу, теоретичного та практичного дослідження нових алгоритмів векторного керування АД, які мають властивості адаптації до варіацій активних опорів статора та ротора, що є суттєвим при створенні електромеханічних систем з високими динамічними властивостями і показниками енергетичної ефективності. Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному.

1. На основі аналізу існуючих рішень в області векторного керування АД обґрунтована актуальність розвитку методів синтезу з метою розробки нових алгоритмів векторного керування, які забезпечують високі показники якості керування моментом (швидкістю) та потоком завдяки адаптації до варіацій активних опорів статора та ротора, а також є простими з точки зору практичної реалізації.

2. Аналітично та на основі математичного моделювання показані суттєві недоліки алгоритмів ідентифікації активного опору ротора в умовах варіації активного опору статора, що підтверджує необхідність створення алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів АД.

3. Показано, що алгоритм непрямого векторного керування, який є робастним до варіацій активного опору ротора, має також властивості робастності до варіацій

активного опору статора. Виявлені властивості одночасної робастності до варіацій активних опорів машини потенційно дозволяють використовувати розглянутий алгоритм для створення систем векторного керування з адаптацією до варіацій активних опорів статора і ротора АД.

4. Отримав подальший розвиток метод синтезу алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів статора та ротора асинхронних двигунів для нульової кутової швидкості ротора. Синтезовані два алгоритми одночасної ідентифікації активних опорів статора та ротора 5-го порядку можуть застосовуватись в електромеханічних системах технологічних об'єктів, режими роботи яких передбачають періодичні короткотривалі зупинки АД.

5. Удосконалено метод синтезу алгоритмів ідентифікації активних опорів для постійної кутової швидкості ротора, який базується на спеціальних перетвореннях моделі АД до лінійно параметризованої форми. Новий алгоритм 8-го порядку не містить процедури розімкненого інтегрування, рекомендується для використання в електромеханічних системах з тривалими квазістатичними режимами роботи.

6. Розроблено метод синтезу алгоритмів ідентифікації шляхом розширення вектору стану АД до електричних зарядів статорного кола, з використанням якого синтезовано новий алгоритм ідентифікації активних опорів АД для загального випадку змінної кутової швидкості. Синтезований алгоритм має 10-й порядок на відміну від 11-го для відомих теоретично обґрунтованих рішень.

7. Усі синтезовані в роботі алгоритми ідентифікації гарантують локальну асимптотичну ідентифікацію активних опорів статора і ротора, якщо умови персистентності збудження забезпечуються, мають суттєві переваги у порівнянні з відовими теоретично обґрунтованими рішеннями, а саме: а) не використовують надлишкову параметризацію, тому умови персистентності збудження спрощуються і набувають не тільки математичного формулювання, але й фізичного трактування; б) нижчий порядок диференційних рівнянь і простіша структура з меншою кількістю коефіцієнтів зворотних зв'язків спрощують налаштування системи.

8. Теоретично обґрунтовано правомірність використання нелінійного принципу розділення для побудови адаптивних до варіацій активних опорів статора і ротора систем непрямого векторного керування швидкістю (моментом) та потоком АД.

9. Створено комплекс програм для дослідження синтезованих систем адаптивного векторного керування та ідентифікації методом математичного моделювання, за допомогою яких проведено повномасштабне дослідження динамічних та статичних характеристик запропонованих систем, яке підтверджує їх ефективність.

10. Розроблено комплекс програм для експериментального дослідження та практичної реалізації розроблених систем, з використанням яких експериментально підтверджено, що запропоновані алгоритми адаптивного керування дозволяють компенсувати негативний вплив варіацій активних опорів статора та ротора на якість керування моментом (швидкістю) та потоком АД.

11. Результати виконаних в дисертації досліджень впроваджено в електромеханічних системах тягового призначення для перспективних моделей тролейбусів та трамвайних вагонів ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», а також використовуються в

навчальному процесі Національного технічного університету України «КПІ».

12. Обґрунтованість та достовірність наукових досліджень, висновків та рекомендацій підтверджено узгодженням результатів теоретичних досліджень та експериментального тестування.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пересада С. М. Векторне керування моментом асинхронного двигуна, адаптивне до варіацій активних опорів статора і ротора, побудоване на основі нелінійного принципу розділення / С. М. Пересада, М. А. Коноплінський, В. М. Трандафілов // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України. – 2014. – №39. – С. 44–51.

2. Пересада С.М. Алгоритм одновременной идентификации активных сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя // С.М. Пересада, М.А. Коноплинский / Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – №03 (79). – С. 270–271.

3. Peresada S. Identification of stator and rotor resistances of induction motors // S. Peresada, S. Lyshevsky, S. Kovbasa, M. Konoplinsky / Electrotechnic and computer systems. – 2013. – №09 (85). – С. 7–15.

4. Пересада С.М. Ідентифікація активних опорів асинхронного двигуна за допомогою адаптивного спостерігача потокозчеплення // С.М. Пересада, М.А. Коноплинский / Технічна електродинаміка. – 2013. – №1. – С. 40–48. (SCOPUS)

5. Пересада С.М. Новий алгоритм ідентифікації активних опорів статора і ротора асинхронного двигуна // С.М. Пересада, М.А. Коноплинский / Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Випуск 3/2012 (19). – С. 94–96.

6. Коноплінський М.А. Ідентифікація активних опорів статора і ротора асинхронного двигуна з малим часом збіжності [Електронний ресурс] / М.А. Коноплінський // Тези доповідей за матеріалами II Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ-2013». – 2013. С. 49. – Режим доступу: http://conf.vntu.edu.ua/energo/2013/tezy_dopov_okey-2013.pdf#page=49.

7. Коноплінський М.А. Дослідження алгоритму ідентифікації активних опорів статора і ротора асинхронного двигуна при різних тестових сигналах // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2014. – №1 – С. 86–89.

8. Пересада С. М. Векторне керування моментом асинхронного двигуна, адаптивне до варіацій активних опорів статора і ротора: результати експериментального тестування / С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, М. А. Коноплінський // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 1/2015 (29). – С. 10–16.

9. Пересада С. М. Векторне керування моментом асинхронного двигуна, адаптивне до варіацій активних опорів статора і ротора: результати експериментального тестування / С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, М. А. Коноплінський // Проблеми енергоресурсозбереження в електромеханічних системах. Наука, освіта і практика. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (2). – С. 26–28.

АНОТАЦІЇ

Коноплінський М.А. Адаптивне векторне керування асинхронними двигунами при варіаціях активних опорів статора та ротора. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Міністерство освіти і науки України, м. Київ, 2016.

Дисертація присвячена питанням розробки та дослідження нових адаптивних до варіацій активних опорів статора та ротора систем непрямого векторного керування АД.

Розроблено узагальнений метод синтезу алгоритмів одночасної ідентифікації активних опорів статора та ротора АД, котрі є простішими за відомі теоретично обґрунтовані рішення для наступних режимів роботи АД: при нерухомому роторі; при постійній кутовій швидкості ротора АД; При довільній кутовій швидкості АД.

Встановлено, невідомі раніше, властивості одночасної робастності до варіацій активних опорів машини дають можливість використання алгоритму РВК для побудови систем векторного керування, адаптивних до варіацій активних опорів статора і ротора АД.

На основі алгоритму ідентифікації синтезованого без обмежень на режим роботи розв’язана загальнотеоретична задача адаптивного до одночасних варіацій активних опорів статора і ротора непрямого векторного керування потоком і кутовий швидкістю (моментом) АД. Переваги розробленої адаптивної системи у порівнянні з відомими адаптивними до варіацій активного опору ротора системами, що складаються в поліпшенні динамічних і енергетичних показників в умовах параметричних збурень, підтверджені на основі повномасштабних експериментальних досліджень і математичного моделювання.

Ключові слова: асинхронний двигун, непряме полеорієнтування, ідентифікація активних опорів статора та ротора, нелінійний принцип розділення.

Коноплинский М.А. Адаптивное векторное управление асинхронными двигателями при вариациях активных сопротивлений статора и ротора. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» Министерство образования и науки Украины, г. Киев, 2016.

Диссертация посвящена вопросам разработки и исследования новых адаптивных к вариациям активных сопротивлений статора и ротора систем косвенного векторного управления АД.

На основе анализа существующих решений в области векторного управления АД обоснована актуальность развития методов синтеза исследования и практической реализации новых алгоритмов векторного управления АД, обладающие свойствами одновременной адаптации к вариациям активных сопротивлений статора и ротора, а

также более простыми в технической реализации, чем известные ранее.

В результате исследования робастности алгоритма робастного векторного управления установлено, неизвестные ранее, свойства одновременной робастности к вариациям активных сопротивлений машины, которые дают возможность использования этого алгоритма для построения систем векторного управления, адаптивных к вариациям активных сопротивлений статора и ротора АД. Подтверждено, что системы векторного управления, адаптивные к вариациям активного сопротивления ротора, существенно деградируют в условиях вариаций активного сопротивления статора.

Усовершенствован метод синтеза алгоритмов путем преобразования модели АД до линейно параметризованной формы и конструирования обратных связей, адаптивных к вариациям активных сопротивлений статора и ротора наблюдателей вектора тока статора, в которых, в отличие от существующих, не используется избыточная параметризация и процедура разомкнутого интегрирования. Синтезированные алгоритмы на основе информации об угловой скорости, токах и напряжения статора, а также их фильтрованных производных, обеспечивают локальную экспоненциальную идентификацию активных сопротивлений в условиях медленных изменений угловой скорости ротора и неподвижного ротора, имея при этом более простую структуру по сравнению с существующими решениями.

Разработан метод синтеза алгоритмов одновременной идентификации активных сопротивлений статора и ротора на основе адаптивного наблюдателя потокосцепления ротора полного порядка с расширенным до электрических зарядов вектором состояния, согласно которому уравнения динамики ошибок оценивания конструируются в форме, в которой неизмеряемые переменные имеют известную производную, благодаря чему впервые обеспечивается локальная асимптотическая идентификация сопротивлений без использования избыточной параметризации и без ограничений на режимы работы АД.

Теоретически обосновано правомерность использования нелинейного принципа разделения для построения адаптивных к вариациям активных сопротивлений статора и ротора систем косвенного векторного управления скоростью (моментом) и потоком АД.

Создан пакет моделирующих программ для исследования систем адаптивного векторного управления и идентификации методом математического моделирования, с помощью которых проведено полномасштабное исследование их динамических и статических характеристик.

Полномасштабные экспериментальные исследования динамических и статических характеристик синтезированных систем косвенного векторного управления адаптивного к вариациям активных сопротивлений статора и ротора показали, что предложенные системы компенсируют негативное влияние вариаций активных сопротивлений и благодаря этому повышают показатели качества регулирования угловой скорости (момента) и потока АД.

Обоснованность и достоверность научных исследований, выводов и рекомендаций подтверждена совпадением результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Результаты выполненных в диссертации исследований внедрены в

электромеханических системах тягового назначения для перспективных моделей троллейбусов и трамвайных вагонов ГП «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт городского хозяйства», а также используются в учебном процессе в Национальном техническом университете Украины «КПИ».

Ключевые слова: асинхронный двигатель, косвенное полеориентирование, идентификация активных сопротивлений статора и ротора, нелинейный принцип разделения.

Konoplinsky M.A. Adaptive vector control of induction motors on variations of stator and rotor resistances. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree of technical sciences of specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016

The thesis is devoted to research and development of new systems for indirect vector control of induction motors (IM), which have properties of adaptation to variations stator and rotor resistances.

The generalized method of design algorithm for simultaneous identification of stator and rotor resistance of IM, which is simpler than the known theoretically informed decisions for next operating modes of IM: for fixed rotor IM; for constant angular speed of the rotor IM; for arbitrary angular speed of the rotor IM.

Discovered previously unknown properties of the vector control algorithm robust to variations rotor resistance, which are as robustness to variations stator resistance and is a prerequisite for the creation of vector control, adaptive to simultaneous variations of these parameters. General theoretical problem indirect vector control magnetic flux and angular speed (torque) IM responsive to simultaneous variations of stator and rotor resistances based on identification algorithm synthesized without restrictions on operation mode are solved.

Based on the identification algorithm synthesized without saturation on operation mode, general theoretical problem solved responsive to simultaneous variations of resistances stator and rotor indirect vector control magnetic flux and angular velocity (torque) of IM. Advantages of the developed adaptive system compared to known adaptive rotor resistance system that are improving dynamic and energy performance in conditions of parametric perturbations. This was confirmed on the basis of full-scale experimental studies and mathematical modeling.

Keywords: induction motor, indirect field orientation, identification of stator and rotor resistance, nonlinear separation principle.